

Penentuan Kombinasi Jumlah Katalis Dalam Produksi Metanol Menggunakan Metode Fuzzy dan Evolution Strategies

Angga Santoso

Universitas Brawijaya
angga.email.kuliah@gmail.com

Abstrak

Sebagai salah satu bahan baku utama dalam berbagai industri kimia, cara yang paling umum digunakan dalam memproduksi metanol adalah melalui proses hidrogenasi karbon. Proses ini hanya dapat dilakukan dalam suhu yang sangat tinggi dan untuk mencapai suhu tersebut membutuhkan waktu yang sangat lama. Salah satu cara untuk mengurangi kebutuhan suhu tersebut adalah menggunakan suatu campuran senyawa kimia yang disebut katalis. Komposisi jumlah katalis yang tepat dan suhu yang sesuai merupakan faktor penting yang menentukan banyaknya produksi metanol yang dihasilkan. Mencari angka yang tepat dari semua kemungkinan melalui uji coba di laboratorium membutuhkan banyak waktu. Oleh karena itu, metode Fuzzy digunakan untuk menghitung banyaknya hasil produksi berdasarkan beberapa percobaan di laboratorium dan algoritma evolution strategies digunakan untuk mencari kombinasi jumlah katalis yang tepat. Katalis yang digunakan dalam uji coba adalah CuO-ZnO-ZrO₂. Metode Fuzzy yang digunakan memperoleh akurasi sebesar 80.7% dengan membandingkan hasil dari laboratorium. Dari algoritma evolution strategies diperoleh produksi metanol paling besar pada komposisi jumlah katalis 40% Cu, 40% Zn, 20% Zr, dan suhu 230°C. Komposisi tersebut dapat digunakan untuk memproduksi methanol dengan hasil paling banyak tanpa harus mencoba semua kemungkinan komposisi.

Kata Kunci: Katalis, Metanol, Hidrogenasi karbon, Evolution strategies, Fuzzy inference system

Abstract

Methanol, as one of primary ingredient in various chemical industries, is commonly produced through hydrogenation of carbon. This process needs to be conducted in a very temperature, in which takes a lot of time to reach. However, there is one way to decrease the temperature needs that is by using a chemical compounds called catalysts. The correct composition of catalyst and appropriate temperature determine the amount of methanol being produced. Yet, finding the correct number from all possibilities obtained through experiments in laboratory is time consuming. Therefore, Fuzzy method is employed to calculate the production result from several experiments and algorithm evolution strategy is utilised to find the perfect catalyst combination. The catalyst being used in the experiments is CuO-ZnO-ZrO₂. The accuracy of Fuzzy method compared to Laboratory result is 80.7%. Meanwhile, algorithm evolution strategy found that the production of methanol reach its highest when the catalyst combination is 40% Cu, 40% Zn, 20% Zr, and the temperature is 230°C. This composition can be used to produced the biggest number of methanol without wasting too much time testing all the possibilities.

Keywords: Catalyst, Methanol, Hydrogenation of carbon, Evolution strategies, Fuzzy inference system

1. Pendahuluan

Methanol merupakan bentuk senyawa paling sederhana dari alkohol dengan rumus kimia CH₃OH. Dalam kehidupan sehari-hari *methanol* dikenal sebagai Spiritus. Dalam industri kimia dan energi, *methanol* merupakan bahan baku primer yang sangat penting. Sehingga kebutuhan *methanol* di dunia pada tahun 2012 mencapai 58.6 MMT [1]. *Methanol* berperan sebagai bahan pelarut dan bahan baku dalam produksi senyawa kimia lain, seperti formalin dan asam asetat [2]. Secara alami, *methanol* juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif campuran bensin [3] dan sebagai sel bahan bakar (*fuel cell*) [4].

Methanol dihasilkan dalam jumlah kecil dengan bentuk uap *methanol* di alam melalui proses metabolisme anaerobik bakteri, namun untuk memenuhi kebutuhan komersial industri

kimia dan energi, *methanol* dapat diproduksi melalui sintesis gas alam, gasifikasi batu bata, dan penyulingan kayu. Sintesis gas alam atau dalam dunia kimia dikenal sebagai hidrogenasi karbon yang digunakan untuk memproduksi *methanol* dalam jumlah besar. Proses hidrogenasi karbon dapat membantu mengurangi kadar emisi karbon di atmosfer, karena mengonversi karbon menjadi senyawa-senyawa baru yang bermanfaat seperti *methanol* [5].

Proses hidrogenasi karbon hanya dapat berlangsung dalam kondisi suhu yang sangat tinggi, yaitu sekitar 800°C. Untuk mencapai suhu yang dibutuhkan, diperlukan energi tinggi dan waktu yang lama. Oleh karena itu, ditambahkan senyawa kimia lain pada proses reaksi hidrogenasi karbon untuk menekan kebutuhan suhu yang sangat tinggi. Senyawa kimia tersebut dikenal sebagai katalis. Katalis sangat memberi dampak signifikan dalam proses reaksi dengan menurunkan suhu yang dibutuhkan menjadi sekitar 200°C-300°C.

Dalam beberapa tahun terakhir, katalis paling banyak digunakan dalam industri adalah Cu, Zn, Cr, dan Pd karena memberikan pengaruh paling besar dalam menurunkan kebutuhan suhu dan meningkatkan jumlah *methanol* yang dihasilkan [6]. Katalis-katalis kemudian digabungkan satu sama lain untuk memperbesar pengaruh yang diberikan. Namun, menggabungkan katalis-katalis dapat menimbulkan permasalahan mengenai komposisi yang tepat dari masing-masing katalis. Memperbanyak jumlah katalis tidak hanya membuang sumber daya, namun dapat menurunkan hasil produksi *methanol*.

Hasil penelitian menunjukkan berbagai kombinasi katalis dapat memberikan hasil berbeda [7]. Setiap kombinasi katalis memiliki komposisi dan kebutuhan suhu berbeda-beda, sehingga banyak dilakukan penelitian untuk mencari komposisi katalis dengan suhu yang tepat untuk masing-masing gabungan katalis dengan melakukan uji coba di laboratorium. Dalam salah satu penelitian sebelumnya [8], dilakukan uji coba laboratorium terhadap 10 macam komposisi katalis gabungan CuO-ZnO-ZrO₂. Didapatkan komposisi katalis paling optimal berupa pada komposisi 38.2% Cu, 28.6% Zn, 33.2% Zr, dan suhu 240°C.

Hasil dalam penelitian tersebut dapat dikatakan bukan yang paling optimal, disebabkan komposisi pengujian hanya 10 macam kombinasi dan didapatkan secara acak, sehingga hasil tersebut merupakan yang paling optimal dari 10 macam kombinasi, bukan dari keseluruhan kombinasi. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penulis menggunakan metode Fuzzy untuk menghitung perkiraan produksi menggunakan data uji coba dari laboratorium dan algoritma *evolution strategies* untuk mencari kombinasi komposisi yang paling tepat.

2. Metode Penelitian

2.1 Metode Fuzzy

Metode Fuzzy merupakan metode untuk membantu memutuskan atau memecahkan suatu permasalahan dengan menggunakan basis aturan IF-THEN. Dalam penelitian ini, logika Fuzzy yang digunakan adalah Fuzzy Tsukamoto. *Rule* yang digunakan dibuat berdasarkan data pada Tabel 1 diperoleh dari hasil uji coba di laboratorium [8].

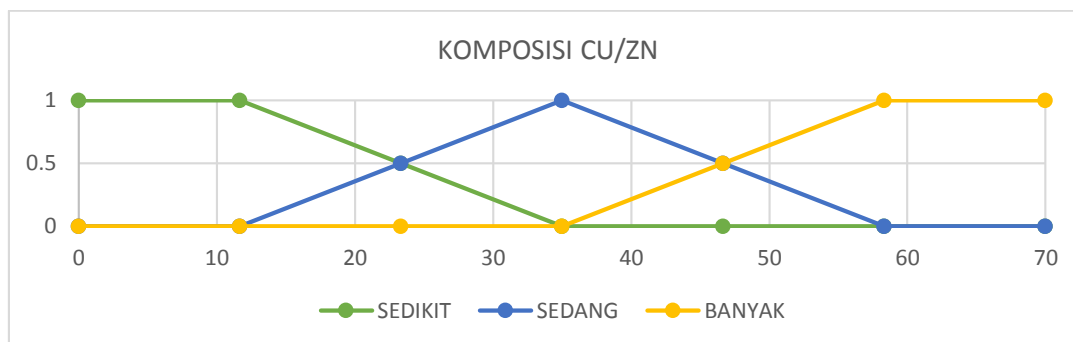
Tabel 1. Hasil Uji Coba Laboratorium

Sample	Komposisi Katalis (%)			Hasil Produksi Methanol (gram)				
	Cu	Zn	Zr	220°C	240°C	250°C	260°C	280°C
CZZ-1	70	0	30	80	110	130	140	150
CZZ-2	60	10	30	120	140	145	135	120
CZZ-3	50	20	30	130	155	165	150	120
CZZ-4	40	30	30	190	220	200	180	115
CZZ-5	35	35	30	120	200	195	155	90
CZZ-6	30	40	30	145	175	170	155	120
CZZ-7	0	70	30	0	0	0	0	10
CZZ-8	57.14	42.86	0	125	140	130	120	115
CZZ-9	45.71	34.29	20	190	195	190	165	130
CZZ-10	34.28	25.72	40	145	155	150	130	120

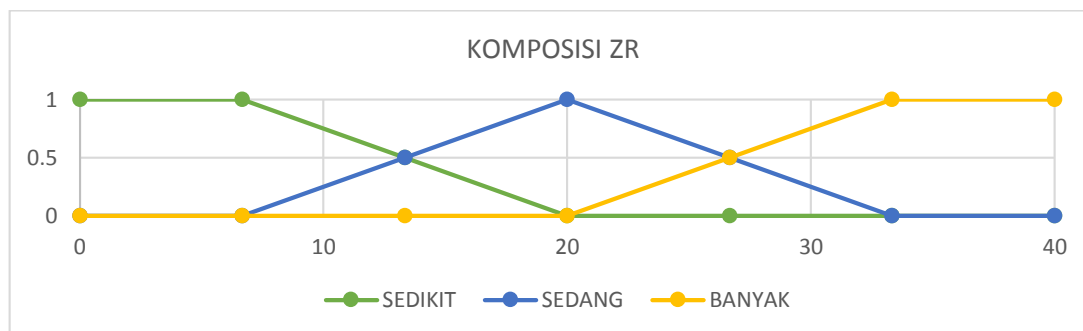
2.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan adalah suatu fungsi dengan interval 0 sampai 1 yang merepresentasikan nilai *input* masing-masing variabel. Fungsi keanggotaan dibuat berdasarkan data pada Tabel 1. Seperti dalam Gambar 1, fungsi keanggotaan untuk komposisi Cu dan Zn adalah sedikit untuk komposisi dari 0% hingga 35%, sedang untuk komposisi dari 11.6% hingga 58.3%, dan banyak untuk komposisi dari 35% hingga 70%. Kemudian untuk komposisi ZR

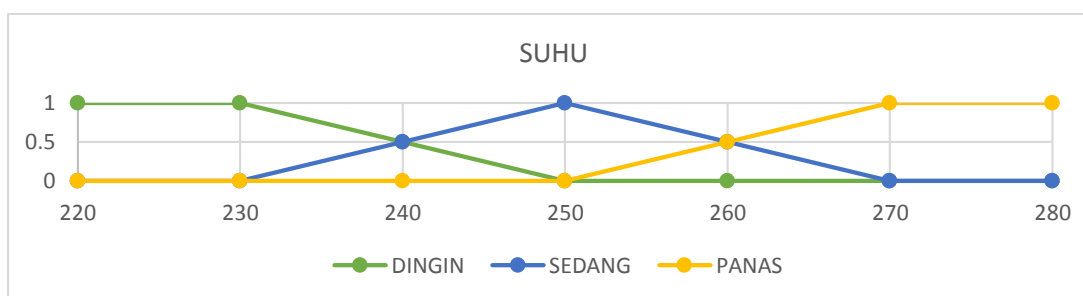
dijelaskan oleh Gambar 2, yaitu sedikit untuk komposisi dari 0% hingga 20%, sedang untuk komposisi dari 6.6% hingga 33.3%, dan banyak untuk komposisi dari 20% hingga 40%. Lalu sesuai dengan Gambar 3 fungsi keanggotaan untuk suhu adalah dingin untuk suhu antara 220°C hingga 250°C, sedang untuk suhu antara 230°C hingga 270°C dan panas untuk suhu antara 250°C hingga 280°C. Hasil produksi *methanol* sesuai dengan Gambar 4 adalah sangat sedikit untuk hasil antara 0 gram hingga 100 gram, sedikit untuk hasil antara 80 gram hingga 150 gram, sedang untuk hasil antara 100 gram hingga 220 gram, banyak untuk hasil antara 160 gram hingga 220 gram.



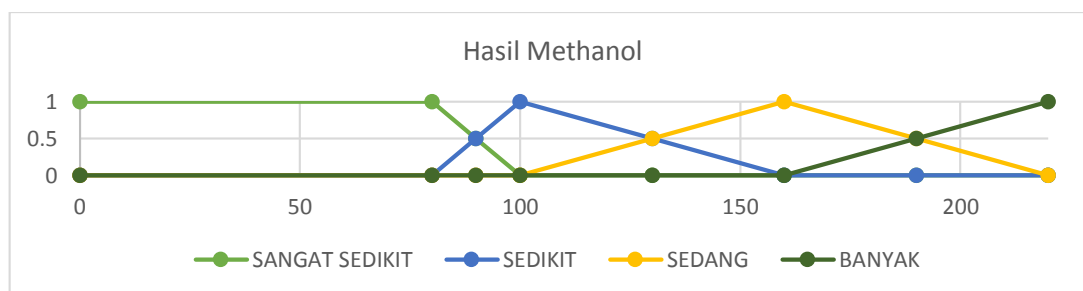
Gambar 1. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Komposisi Cu dan Zn



Gambar 2. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Komposisi Zr



Gambar 3. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Suhu



Gambar 4. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Hasil Produksi Methanol

2.3 Evolution Strategies

Mengadaptasi proses evolusi yang terjadi pada makhluk hidup, algoritma *evolution strategies* memiliki beberapa tahapan meniru proses evolusi pada makhluk hidup. Awalnya algoritma *evolution strategies* memiliki sekumpulan individu dalam bentuk kromosom, membentuk sebuah populasi awal. Dari individu-individu ini akan terjadi proses reproduksi yang menghasilkan keturunan dengan mewarisi kromosom induknya. Induk yang baik akan berpeluang besar menghasilkan keturunan sifat baiknya pula. Selanjutnya dari bertambahnya jumlah populasi, dilakukan proses pemilihan individu menjadi penerus bagi generasi berikutnya. Hal ini dilakukan terus-menerus hingga keadaan berhenti telah tercapai.

2.4 Representasi Kromosom

Faktor penting menentukan keberhasilan algoritma evolusi dalam menemukan solusi dari pencarian masalah adalah seberapa baik representasi kromosom dibuat. Mencapai solusi optimal dalam mencari nilai komposisi dan suhu yang paling tepat, kromosom terdiri dari 4 segmen yang merupakan komposisi dari masing-masing katalis dan suhu yang dibutuhkan. Pada Tabel 2, kromosom pada segmen 1 berisi nilai x , yaitu variabel yang berubah naik atau turun untuk masing-masing katalis yang merepresentasikan seberapa besar nilai komposisi suatu katalis terhadap katalis lainnya. Pada Tabel 3, kromosom pada segmen 2 berisi nilai σ , karena nilai yang menentukan seberapa besar kenaikan atau penurunan pada variabel di segmen 1 dalam komposisi katalis dan kolom ke 4 di segmen 3 untuk suhu. Pada Tabel 4, kromosom pada segmen 3 berisi nilai yang digunakan sebagai *input* untuk menghitung nilai *fitness* pada segmen 4. Nilai pada kolom 1 sampai 3 pada segmen 3 selalu berjumlah 100% sehingga untuk menghitung nilai tersebut digunakan persamaan 1, 2, dan 3. Tabel 5 berisi nilai *fitness* dari metode Fuzzy dengan *input* kromosom pada segmen 3.

$$\%Cu = \frac{xCu}{(xCu + xZn + xZr)} \times 100\% \quad (1)$$

$$\%Zn = \frac{xZn}{(xCu + xZn + xZr)} \times 100\% \quad (2)$$

$$\%Zr = \frac{xZr}{(xCu + xZn + xZr)} \times 100\% \quad (3)$$

Tabel 2. Representasi Kromosom Segmen 1

x Cu	x Zn	x Zr
------	------	------

Tabel 3. Representasi Kromosom Segmen 2

σ Cu	σ Zn	σ Zr	σ Suhu
-------------	-------------	-------------	---------------

Tabel 4. Representasi Kromosom Segmen 3

% Cu	% Zn	% Zr	°C Suhu
------	------	------	---------

Tabel 5. Representasi Kromosom Segmen 4

fitness

2.5 Inisialisasi Kromosom

Pada tahap inisialisasi kromosom, dibangkitkan nilai secara acak untuk segmen 1, 2, dan kolom ke 4 pada segmen 3. Selanjutnya menghitung nilai untuk kolom 1-3 pada segmen 3 dengan persamaan 1, 2, dan 3. Segmen 1 dan 2 berisi bilangan acak antara 0 sampai 1, sedangkan kolom ke 4 pada segmen 3 berisi bilangan acak dengan rentang 220 sampai 280. Kromosom yang dibangkitkan dibuat sebanyak jumlah populasi.

2.6 Reproduksi

Setiap individu yang terdapat dalam populasi, dilakukan proses reproduksi. Reproduksi adalah sebuah proses pembentukan individu baru dengan kromosom yang menyerupai induknya. Tujuannya adalah mencari individu-individu baru yang memiliki nilai *fitness* lebih baik. Dalam proses reproduksi, kromosom anak pada segmen 1 dan kolom 4 segmen 3 diisi dengan melakukan proses mutasi dengan cara menambahkan atau mengurangi segmen 1 dan kolom 4

segmen 3 dalam induk, dengan segmen 2 pada induk yang dikalikan nilai acak N secara berurutan. Menurut penelitian [9], nilai N yang baik adalah suatu bilangan yang diperoleh menggunakan persamaan 5. Selanjutnya nilai segmen 2 pada anak diisi dengan nilai segmen 2 pada *parent* dengan ketentuan dinaikkan 10%, jika 20% dari anak memiliki nilai *fitness* lebih baik dan diturunkan 10% jika sebaliknya. Nilai segmen 4 pada anak diisi menggunakan metode Fuzzy dengan nilai segmen 3 pada anak sebagai *input*.

$$N(0,1) = \sqrt{-2 \sin r1 \sin 2\pi r2} \quad (4)$$

2.7 Evaluasi Fungsi *Fitness*

Fungsi *fitness* yang digunakan ditunjukkan pada Persamaan 6, dimana nilai *fitness* didapatkan menggunakan metode Fuzzy kemudian dikurangi nilai *penalty*, jika melanggar ketentuan sebagai berikut:

1. Nilai pada kolom 1 dan 2 segmen 3 tidak boleh lebih kecil dari 0 dan lebih besar dari 70.
2. Nilai pada kolom 3 segmen 3 tidak boleh lebih kecil dari 0 dan lebih besar dari 40.
3. Nilai pada kolom 4 segmen 3 tidak boleh lebih kecil dari 220 dan lebih besar dari 280.

Untuk setiap ketentuan yang dilanggar, besar pelanggaran terhadap batas yang ditentukan dikalikan 1000 dan diakumulasikan sebagai nilai total *penalty*.

$$fitness = produksi \text{ dari fuzzy} - penalty \quad (5)$$

2.8 Seleksi

Seleksi merupakan proses untuk menentukan individu mana yang akan menjadi penerus bagi generasi berikutnya. Seleksi menggunakan teknik *elitism selection*, yaitu memilih berdasarkan nilai *fitness* paling tinggi. Banyaknya individu yang lolos adalah sejumlah ukuran populasi dan yang berhak mengikuti seleksi adalah gabungan dari induk dan anak. Individu yang lolos seleksi akan masuk ke generasi berikutnya untuk menjadi induk dalam proses reproduksi selanjutnya.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Untuk mengetahui tingkat kesuksesan metode Fuzzy dan algoritma *evolution strategies* dalam mencari solusi yang terbaik dalam menentukan komposisi dan suhu yang tepat untuk katalis CuO-ZnO-ZrO₂, maka perlu dilakukan beberapa pengujian. Pengujian yang dilakukan untuk metode Fuzzy adalah menguji tingkat akurasi, sedangkan algoritma *evolution strategies* dilakukan pengujian ukuran populasi, pengujian *offspring*, dan pengujian jumlah generasi. Setiap ukuran populasi, pengujian *offspring*, dan pengujian jumlah generasi dilakukan 10 kali pengujian, kemudian diambil nilai rata-rata nilai *fitness* yang didapatkan.

3.1 Pengujian Akurasi Metode Fuzzy

Saat menguji tingkat akurasi dari metode Fuzzy yang dibuat, dilakukan perbandingan antara hasil uji coba dari laboratorium dengan hasil perhitungan menggunakan metode Fuzzy. Dari data pada Tabel 6 menunjukkan nilai akurasi yang diperoleh dari metode Fuzzy sebesar 80.7%.

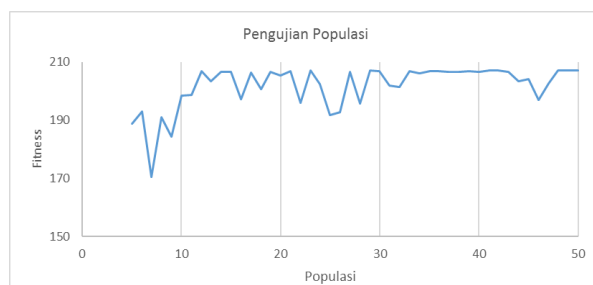
3.2 Pengujian Populasi

Jumlah populasi yang sesuai untuk setiap permasalahan berbeda-beda. Maka, dilakukan pengujian populasi untuk mengetahui jumlah populasi yang tepat, sehingga diperoleh hasil optimal. Pengujian dilakukan dengan mencoba ukuran populasi antara 5 sampai 50 dengan ukuran *offspring* adalah 5 dan dijalankan sepanjang 50 generasi. Dari grafik pada Gambar 5 dapat disimpulkan, jika populasi kurang dari 10, maka hasil yang didapatkan tidak maksimal karena nilai *fitness* masih minimal dan sangat tidak stabil. Nilai *fitness* berada pada posisi stabil dengan nilai yang maksimal setelah populasi berjumlah diatas 30. Pada jumlah populasi lebih dari 50 tidak terdapat perubahan signifikan, sehingga menambah ukuran populasi hanya akan membuang-buang waktu komputasi yang dibutuhkan. Meningkatkan ukuran populasi berpeluang meningkatkan hasil karena menambah daerah eksplorasi, namun ukuran populasi yang terlalu tinggi akan menambah waktu komputasi, sedangkan ukuran populasi yang terlalu sedikit akan mengurangi tingkat keberhasilan [10]. Oleh karena itu, diperlukan ukuran

populasi yang tepat, agar mendapatkan hasil paling optimal dengan waktu komputasi yang sesuai.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Laboratorium dengan Hasil Fuzzy

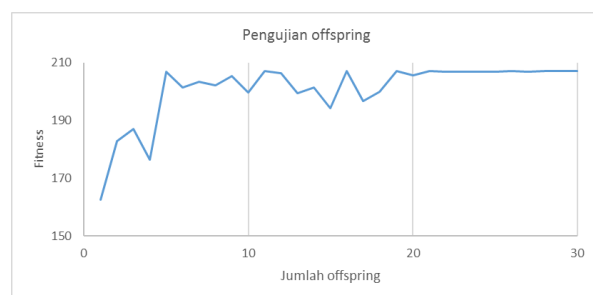
Cu	Zn	Zr	Suhu	Lab	Fuzzy	Selisih
70	0	30	220	80	116.6667	36.66667
70	0	30	240	110	126	16
70	0	30	250	130	132.5	2.5
70	0	30	260	140	135	5
70	0	30	280	150	132.5	17.5
60	10	30	220	120	116.6667	3.333333
60	10	30	240	140	126	14
60	10	30	250	145	132.5	12.5
60	10	30	260	135	135	0
60	10	30	280	120	132.5	12.5
50	20	30	220	130	133.4615	3.461538
50	20	30	240	155	143.4861	11.51386
50	20	30	250	165	149.966	15.03401
50	20	30	260	150	145.8896	4.11039
50	20	30	280	120	137.415	17.41497
40	30	30	220	190	151.4042	38.59578
40	30	30	240	220	155.0251	64.97494
40	30	30	250	200	172.8571	27.14286
40	30	30	260	180	152.4848	27.5152
40	30	30	280	115	136.7096	21.7096
35	35	30	220	120	158.5	38.5
35	35	30	240	200	164.1667	35.83333
35	35	30	250	195	181.4286	13.57143
35	35	30	260	155	157.5	2.5
35	35	30	280	90	136.4286	46.42857
30	40	30	220	145	153.5432	8.543233
30	40	30	240	175	155.6101	19.38988
30	40	30	250	170	172.0779	2.077922
30	40	30	260	155	148.4582	6.541812
30	40	30	280	120	131.987	11.98701
0	70	30	220	0	85	85
0	70	30	240	0	90	90
0	70	30	250	0	85	85
0	70	30	260	0	90	90
0	70	30	280	10	85	75
57.14	42.86	0	220	125	106.7371	18.26286
57.14	42.86	0	240	140	135	5
57.14	42.86	0	250	130	160	30
57.14	42.86	0	260	120	135	15
57.14	42.86	0	280	115	106.7371	8.262857
45.71	34.29	20	220	190	192.46	2.46
45.71	34.29	20	240	195	190	5
45.71	34.29	20	250	190	192.46	2.46
45.71	34.29	20	260	165	175	10
45.71	34.29	20	280	130	160	30
34.28	25.72	40	220	145	154.6971	9.697143
34.28	25.72	40	240	155	162	7
34.28	25.72	40	250	150	178.0686	28.06857
34.28	25.72	40	260	130	155	25
34.28	25.72	40	280	120	133.9771	13.97714
34.28	25.72	40	280	120	133.9771	13.97714



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Ukuran Populasi

3.3 Pengujian Offspring

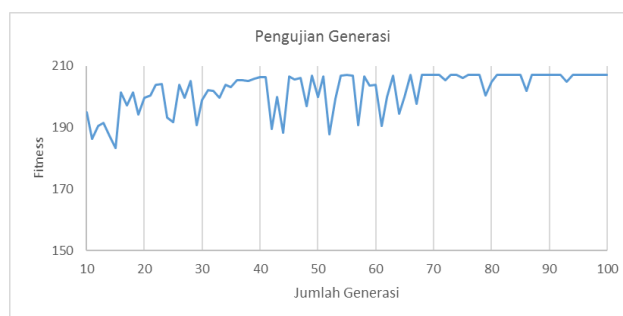
Pengujian *offspring* dilakukan untuk mendapatkan jumlah *offspring* yang sesuai dengan permasalahan yang dicari. Sama seperti ukuran populasi, nilai *offspring* yang tidak sesuai akan mengurangi tingkat keberhasilan dan menambah waktu komputasi. Maka ketepatan nilai *offspring* sama pentingnya seperti ukuran populasi yang tepat. Dalam pengujian ini, nilai *offspring* yang diuji coba berada pada besaran 1 sampai 30 *offspring*. Untuk populasi dan generasi masing-masing bernilai 10 dan 50. Dari grafik pada Gambar 6 terlihat ukuran *offspring* dengan nilai *fitness* paling tinggi dan stabil mulai terlihat pada besaran *offspring* diatas 20. Sebelumnya, nilai *fitness* yang diperoleh belum maksimal dan masih berada dalam posisi labil.



Gambar 6. Grafik Hasil Pengujian Jumlah Offspring

3.4 Pengujian Generasi

Generasi merupakan ukuran berapa kali reproduksi dan seleksi diulang. Semakin banyak ukuran generasi, maka dapat dipastikan perolehan hasil akan semakin baik. Namun ukuran generasi yang terlalu besar tidak akan memberi pengaruh signifikan ketika nilai *fitness* paling optimal telah dicapai dan hanya akan membuang-buang waktu komputasi. Oleh karena itu, ukuran generasi yang tepat akan menghemat waktu dengan perolehan hasil yang tetap optimal. Uji coba jumlah generasi berada pada rentang 10 sampai 100 dengan besaran populasi dan *offspring* adalah 10. Dari hasil grafik pada Gambar 7, terjadi kestabilan nilai *fitness* ketika generasi menyentuh angka 70. Setelah itu terjadi beberapa penurunan nilai *fitness* dan hal tersebut dapat dipahami karena *evolution strategies* merupakan algoritma yang bersifat *stochastic*.



Gambar 7. Grafik Hasil Pengujian Generasi

3.5 Pengujian Suhu dan Jumlah Komposisi Katalis CuO-ZnO-ZrO₂

Dengan menggunakan nilai yang didapatkan pada pengujian sebelumnya, yaitu populasi sebesar 30, *offspring* sebesar 10, dan generasi sebanyak 100. Didapatkan hasil

komposisi dengan produksi *methanol* paling banyak sebesar 207 gram pada angka 39.9% Cu, 40% Zr, dan 19.9% Zn dengan suhu 229.9°C dan 250°C. Melihat kebutuhan energi untuk mencapai suhu 229.9°C lebih sedikit daripada kebutuhan energi untuk mencapai suhu 250°C, maka dapat diputuskan bahwa komposisi dan suhu paling optimal ada di angka 39.9% Cu, 40% Zr, dan 19.9% Zn dengan suhu 229.9°C.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pada pengujian-pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa keberhasilan perolehan solusi sangat tergantung terhadap parameter-parameter yang digunakan seperti ukuran populasi, ukuran *offspring*, dan banyaknya generasi. Selain itu, metode yang digunakan untuk menghitung nilai *fitness* memberikan peran yang sangat besar terhadap solusi yang dihasilkan. Gabungan antara algoritma *evolution strategies* dan metode Fuzzy Tsukamoto dalam menentukan jumlah komposisi dan suhu pada produksi *methanol* menghasilkan solusi 39.9% Cu, 40% Zr, 19.9% Zn dengan suhu 229.9°C dan menghasilkan produksi *methanol* sebanyak 207 gram. Kelebihan menggunakan gabungan algoritma ini adalah tidak perlu menguji semua kombinasi komposisi di laboratorium, hanya dengan melakukan beberapa percobaan dapat dicari kombinasi komposisi yang paling optimal. Namun kelemahannya adalah kombinasi yang dihasilkan sangat bergantung kepada banyaknya data hasil uji coba dari laboratorium, semakin banyak kombinasi pengujian, maka tingkat akurasi akan semakin meningkat. Selain itu, komposisi yang dihasilkan hanya berupa perkiraan, sehingga perlu dilakukan uji coba di laboratorium untuk membuktikan kebenaran hasil dari penelitian ini.

4.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan dengan memperbaiki metode Fuzzy Tsukamoto yang digunakan sebagai pengujian nilai *fitness*. Metode Fuzzy Tsukamoto hanya memperoleh akurasi sebesar 80.7%, angka ini dapat ditingkatkan dengan mengoptimasi fungsi keanggotaan dari masing-masing *input* menggunakan algoritma evolusi lain, seperti algoritma genetika. Selain itu dapat dilakukan pengujian fungsi nilai *fitness* dengan menggunakan metode Fuzzy lainnya, seperti Fuzzy Mamdani dan Fuzzy Sugeno, bahkan menggunakan metode Fuzzy yang lebih baik seperti Neuro Fuzzy.

Referensi

- [1] G. Centi and S. Perathoner. "Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels." *Catal. Today*. Vol. 148. 3–4 (2009): 191–205.
- [2] E. E. Ortelli, J. Wambach, and A. Wokaun. "Methanol synthesis reactions over a CuZr based catalyst investigated using periodic variations of reactant concentrations," *Appl. Catal. A Gen.* Vol 216. 1–2 (2001): 227–241.
- [3] G. A. Olah, A. Goepfert, and G. K. S. Prakash. *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy: Second Edition*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [4] D. R. Palo, R. A. Dagle, and J. D. Holladay. "Methanol steam reforming for hydrogen production." *Chemical Reviews*. Vol. 107. 10 (2007): 3992–4021.
- [5] G. A. Olah, A. Goepfert, and G. K. S. Prakash. "Chemical recycling of carbon dioxide to methanol and dimethyl ether: From greenhouse gas to renewable, environmentally carbon neutral fuels and synthetic hydrocarbons." *Journal of Organic Chemistry*. Vol. 74. 2 (2009): 487–498.
- [6] X. Liu, G. Lu, Z. Yan, and J. Beltramini. "Recent advances in catalysts for methanol synthesis via hydrogenation of CO and CO₂," *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42.25 (2003): 6518–6530.
- [7] S. G. Jadhav, P. D. Vaidya, B. M. Bhanage, and J. B. Joshi. "Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies," *Chemical Engineering Research and Design*. 92.11 (2014): 2557–2567.
- [8] T. Witoon, N. Kachaban, W. Donphai, P. Kidkhunthod, K. Faungnawakij, M. Chareonpanich, and J. Limtrakul. "Tuning of catalytic CO₂ hydrogenation by changing composition of CuO–ZnO–ZrO₂ catalysts." *Energy Conversion and Management* 118 (2016): 21–31.
- [9] H. P. Schwefel. "Evolution and Optimum Seeking." John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [10] W. F. Mahmudy, R. M. Marian, and L. H. S. Luong. "Real Coded Genetic Algorithms for Solving Flexible Job-Shop Scheduling Problem - Part I: Modelling." *Adv. Mater. Res.*, Vol. 701 (2013): 359–363.